

電波流速計による洪水流量観測 —河川砂防技術基準への反論と2つの事例紹介—

A DISCUSSION ABOUT FLOODFLOW MEASUREMENT BY RADIO CURRENT METER OF TECHNICAL STANDARD OF RIVER AND SABO ENGINEERING, MLITT, AND INTRODUCTION OF TWO FIELD STUDY RESULTS USING RADIO CURRENT METER.

山口 高志¹
Takayuki YAMAGUCHI

¹名誉会員 工博 (〒277-0863千葉県柏市豊四季645-14)

In the Technical Standard about river and Sabo engineering of Ministry of L.I.T.and T, which direction must be chosen, upsteam or downstream of the bridge, is not shown about the installation of radio current meters. Upstream must be clearly chosen.

In addition, average velocity correction factor must be given as $f=0.85$. The installation of radio current meter not be delayed because of field study (f) using by ADCP.

In A river, relationship between flood-flow discharge by floats and radio current meter, is improved by the correction of data with error.

In B river, the reason why the abnormal relationship between H and V have existed during long term(7years or more) is clearly shown due to riverbed degradation in the upstream of the K. weir.

Key Words : Floodflow discharge ,radio current meter.

1. はじめに

わが国における河川の洪水流量観測を概観すれば、戦前からおよそ70年余り浮子法のみで頼ってきた。その間多くの試みがなされてきたが、浮子法をけおとせるまでには到っていない。

浮子法も多くの欠陥を有しており、多くの方の指摘がなされているが(1,2)、筆者は、とりわけ (1) 浮子投下のため橋梁下流を利用しながら、橋脚による後流域を無視していることによるデータの過大化傾向、(2) 人力にたよっているため、遅延による初期データの不足、ひいては大出水時の撤退が最大の欠点と考えている(1~3)。

論を戻して、しかしこの20年余りについていえば、浮子の上記の欠陥を補うべく、電波流速計に代表される非接触法、接触ではあるが水深方向の流向流速分布が観測可能なADCPなどを用いた洪水流速観測が、多くの研究者によって多くの現場で実施され、格段の発展をとげたのであった(4,5,6,7,8,9)。なかでも特筆すべきことは、木下良作氏のADCP発展への寄与(4, など)、1999年あたり

から、6~7年続けられた土木研究所による非接触4手法に関する現地試験などが挙げられよう(10,11)。筆者も電波流速計の普及には努力を盡して来たが(12,13)、最近では手計太一氏らによる「河川流量観測の新時代」(1~3巻)の刊行も見逃せない(7~9)。

非接触法とりわけ電波流速計は、表面流速のみしか測れないが、橋脚後流域を避けて擾乱の少ない上流側を選び、無人で、加えて少ない台数で出水初期からデータを採取し続けるものである。アメリカでも、最近非接触法が試みられているが、論文発表時点でいえば約10年、日本が進んでいる(14)。

これに対して、ADCPは本来アメリカで海洋用に開発されたものではあるが、河川にも適用されその有効性が認められ、例えば、橋上を一往復して2データとってその差を数パーセント以内にしようというすぐれものである。ただし、接触型(例えば三胴式ボート(トリマラン)を利用)であるため、急流速時あるいはゴミの衝突などのため、3~4m/s超になると測定不能となる。

多くの方の努力がみのり、また河川局もこれを認め、非接触法およびADCPが「水文観測」平成8年版、続い

平成14年版にも「新しい洪水観測手法」として紹介され、その採用が勧められた。

しかしながら、2012年度制定された河川砂防技術基準での非接触法の後退ぶりは見事なものであった。「表面流速しかとれない」という特徴が前面に出され、流速分布が採取可能なADCPには、実に4頁がさかされているのに対して、非接触型法にはわずか1.5頁ということであった。加えて、その中にADCPによるフィルターが2か所も入ることになっている。

また、電波流速計の設置箇所について「水文観測」では、橋脚下流の後流域をさけて橋梁上流と明示されているのに対して、まったく設置位置に関する記述がないのである。

筆者も1990年頃から、電波流速計に関わり始め、爾来20有余年そのデータに関わってきた。その長所・短所についてもそれなりの蓄積をもっているつもりである。ここでは章をあらためて反論しておきたい。

この他に電波流速計は、もうひとつメリットがある。すなわち出水期間中データを取り続ける結果、洪水波形によるH～Vsi関係のループの違いや、観測地点における水理変化、とりわけ河床変化（高水敷の場合は粗度変化など）も推定できることがわかってきている(13)。

次いで3. では、電波流速計本来の機能である洪水流量観測に関連して既発表のデータ(10)に一部ミスが認められたので、その修正結果について、4. では、吉野川での電波流速計設置地点で、横断変化があまりないのに、異様なH～Vsの変化を示したので、その検討結果について紹介したい。

2. 河川砂防技術基準(2012)に対する反論

「はじめに」でも触れたように、河川砂防技術基準(2012)に対して以下の二点について反論しておきたい。

2.1 電波流速計(非接触型)の設置箇所は、橋上流側の明示を!

電波流速計を非接触型方式の代表としておきながら、設置箇所の明示がないのは、観測方法の説明としては不完全なことであり、明確な片手落ちといえる。

前にも触れたが、「水文観測」でも橋脚後流域を避けて上流と明示している。後流域の影響の大きさを示す好例として、木下良作氏(1)の図をあえて掲げさせていただくが(図-2.1)、第二測線まで続くその影響の激しさに比して、上流側のじょう乱の少なさに目がひかれる。

ほかに筆者も、上流からピアーに斜めに当たった場合の後流域の範囲の広さについて報告している(9)。

このようにピアーが大きな粗度としての影響のある下流で、流量を測ろうとすれば設置すべき電波流速計の必

要台数は、相当数にのぼると考えられる。

余談かもしれないが、設置ヶ所の明示がなかった理由を類推すれば、流速補正係数 f をはかるためのADCPが下流でしか観測できないこと(観測地点のわずかな不一致)に起因しているのかとも考えられるが、これはささやかなことであろう。

2.2 流速補正係数 f についての討論

端的にいうと流速補正係数は、開水路流速鉛直分布平均の $f=0.85$ でスタートし、その後ADCP等で微修正という形をとるべきである、というのが筆者の意見である。

これまでの表面流速に対する補正係数には、木下良作氏の0.83(平水時?) (1)、二瓶氏の0.88(16)など、またデータ数は少ないが、十勝水路での0.85(8)などがある。また、アメリカの論文(14)も $f=0.85$ を提案している。

これらの値を採用したとしても、 $f=0.85$ とした場合との誤差は、5%以内であり、浮子などの比ではあるまい。まして、橋上流側の場合は、 $f=0.85$ である可能性は高い。

ほかに傍証的ではあるが、土木研究所が既設置の電波流速計算出流量値($f=1.0$)と、浮子による流量とを比較した結果(11)でも、両者はほぼ一致するとしている(次章図-3.1)。これは、浮子流量が10~20%過大であるという通説から推算しても、 $f=0.85$ の裏付けとなると考える。

これについては、次章でも土研の結果の一部修正を行って、浮子流量と電波流量との関係の改善を行った。

もう一点、筆者がもっとも懸念するのは、電波流速計設置にあたって、人力によるADCPによるフィルターが2か所にわたってかかることである。あえて文章の紹介を行えば、「測線の設定に当たっては、ADCPや浮子測法等による現地観測結果などにより、洪水時の横断方向流速分布を事前に把握した上で、それぞれの区分流量が

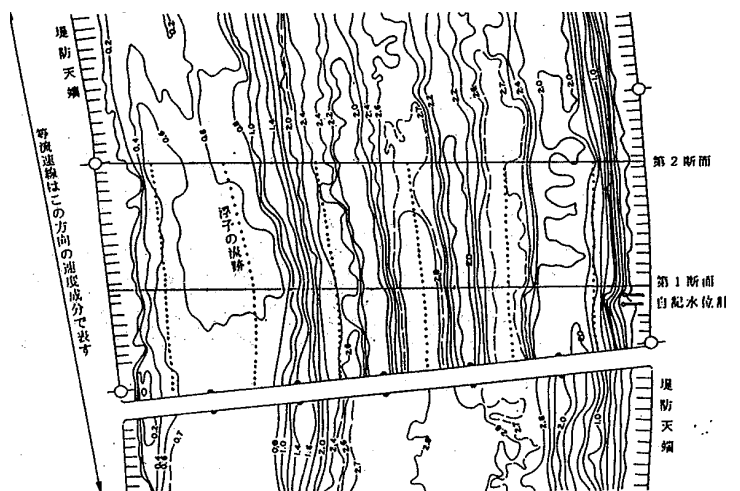


図-2.1 航測による橋付近の表面流速分布図
(長良川墨俣、木下良作氏より)

ほぼ均一になるよう設定する」，これはまだまともである．あと一文，「流速分布補正係数は，ADCPによる様々な規模の洪水時の鉛直方向並びに横断方向の流量分布に関する観測結果から算出した値を用いること」，書いてあることは文字通り正しいことではあるが，しかし実際の問題としては，「様々の規模の洪水」を「人力のADCPではかる」ことは，10年かかってできるかできないかのことである．「人力の浮子」から脱却できたと思ったら，また「人力のADCP」に逆戻り，これが正直，私の実感である．次回改訂では，ご配慮いただきたい．

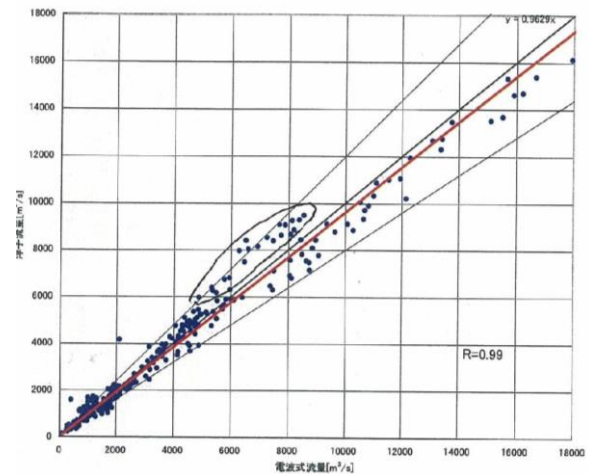


図-31 全観測データ（流量）による相関図

3. 電波流速計流量と浮子流量との比較の一部修正

土木研究所は，2008年に電波流速計を評価する一法として浮子による流量（浮子流量）および既設置の電波流速計が観測した流量（電波流量）のデータを蒐集し（筆者も相当部分協力），個々の河川別，出水別および全データについて比較を行っている(10)．

図-3.1は，全データに対するものである．この図から，流速補正係数は $f = 1.0$ の電波流量 (X) と浮子流量 (Y) が全体としてはほぼ一致することがわかる ($Y = 0.96X$) ．

ここではじめに示したように，もし浮子の流量が真の流量より過大で，しかもそれが10～20%程度とするならば，流速補正係数は $f = 0.85$ 程度でおおよそよいことになる．

少し横道にそれたが，筆者が本論で試みたことは，図-3.1中，全体の傾向から大きくはずれた楕円形に囲まれたデータの修正である．この一群のデータは，筆者が

2年前に指摘した誤観測データ(8)がそのまま使われているので修正を試みることにした．

誤測の原因は，設置された10台の電波流速計のうちの測点6がピアーに近接して設置されていたのであるが，たまたま10年来ともいべき $Q = 10,000 \text{ m}^3/\text{s}$ クラスの出水(2007.4)があり，その後半に流下したゴミがピアーにかかり，その後流域内に電波の照射域が入ったためと考えられる．久しぶりの大きい出水時の大量のゴミが流下，そしてピアーへの付着はよく知られていることで，筆者も何度か知見している．

実際に測点6と近接測点7の水位 (H) ～表面流速 (V_{si}) 図を示す (図-3.2～3) ．図中には前年の(2006.7)の出水のそれも併記してあるが，測点6の低減部分での異常な減速がみとめられよう．

さて，このデータの修正方法であるが，測点6をはさむ測点5および測点7の平均をもってあてることとした．両測点は，測点6からそれぞれ35m，31mはなれている

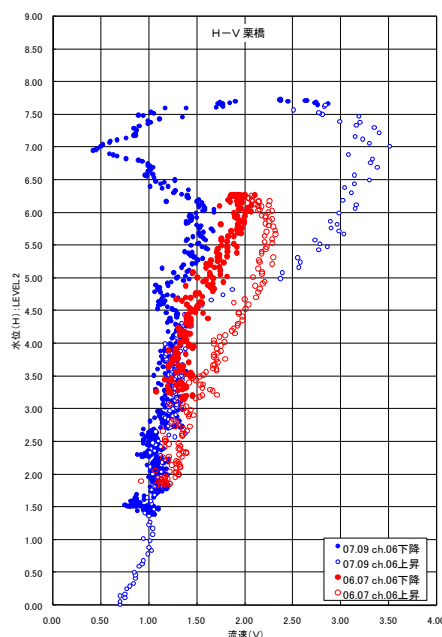


図-3.2 H-Vs6

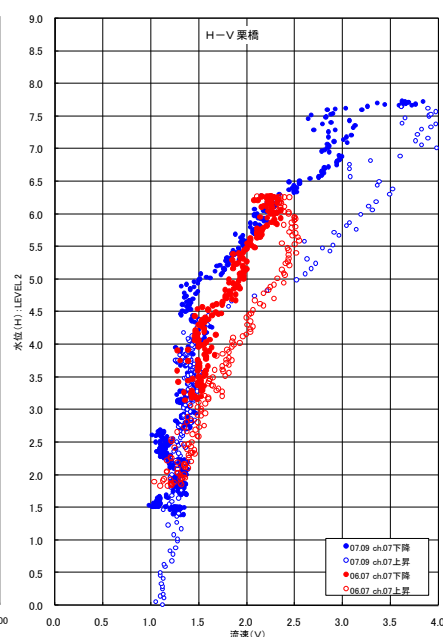


図-3.3 H-Vs7

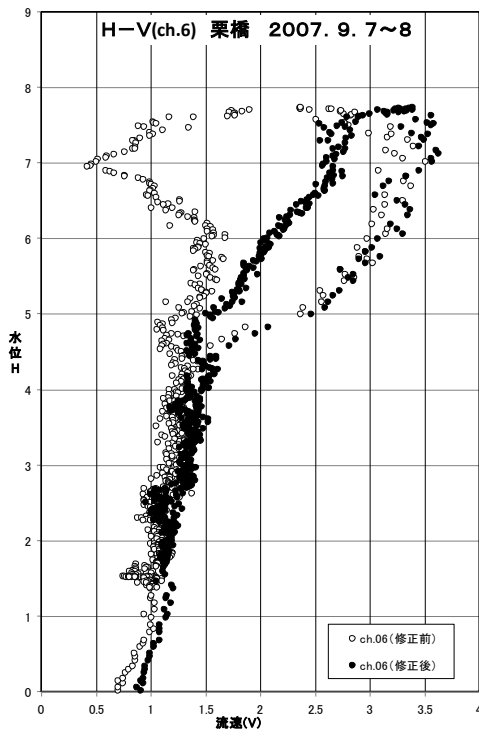


図-3.4 H-Vs6 修正前と修正後

ので不安もあったが、変化の少ない橋上流側であったため予想外にうまくいった。修正前および修正後のH-Vsi関係を図-3.4に示す。立ち上がり部で両データがほとんど一致している。

修正後のH-Vs6を用いて、算出した全流量と修正前のそれと、浮子流量との関係図を図-3.5に示す。浮子流量のデータの大半が低減部であったことも原因して、ほとんどの電波流量の増加となった(200~700m³/s, 5%強)。

参考までに文献(10)の2006年の7月出水の流量相関式は、 $Y=1.0816x$ 、図-3.5中の修正後のそれとほぼ一致する。

以上の修正計算により、図-3.1の相関図の集中度の改善を見ることができた。なお発展させて電波流速計の流速補正係数fの“暫定0.85, 漸時ADCPによる修正”を提案しておきたい。

4. 阿波中央橋における異様なH-Vs関係の解釈

4.1. H-Vsi関係の変化から読みとれる副産物(パイプロダクト)

電波流速計は、複数台以上橋上流などに設置されて、設置地点付近の流速をはかるため、本来の全断面流量の算出以外に、測定地点の水理状況を示してくれる。

多くの地点での観測結果を通して、これまで得られた知見はおおよそ以下のようにまとめることができよう。

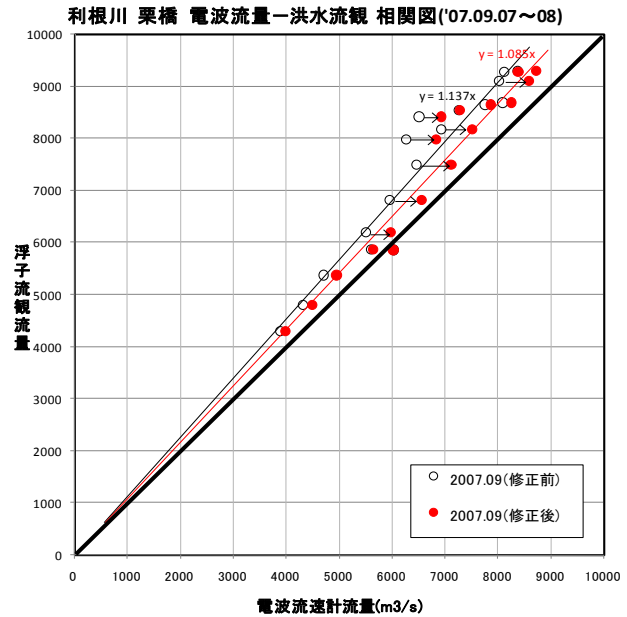


図-3.5 流量相関図(修正前と修正後)

- ひとつの洪水波が通過すると、H-Vsi関係は急流河川では上り下り重なり、ほぼ直線になるのに対し、緩流河川では反時計まわりのループ状を示し、これは緩流になるほどループは大きくなる。1つの地点でのループの大きさも、出水がシャープであるか、でないかで幅が異なる。加えて出水波形の微妙な変化にもH-Vsi関係はシャープに対応して変化する。例えば図-3.3。
- 電波流速計設置地点の河床が低下したり、粗度が低下したりして、出水中に流速増加要因が加わると、時計まわりのループがあらわれたりする。時計まわりループは、本来の反時計まわりのループ特性にうちかってあらわれるわけだから、類形として上り下り重なったり、変形として8の字ループなどもよくあらわれる。

H23年(2011)に、吉野川には久しぶりに3~4の出水があり、なかでも9.21の出水は電波流速計で測った流量では、12000m³/sに達する出水であつたので、この際、大出水があつたH16, H17(2004, 2005)それぞれ4出水、1出水のデータも含めて検討してみることにした。

異様なH-Vs関係について先に触れると、低水路河道内の4基の電波流速計について、多くの出水で各点で河床低下などはないのに、時計まわりループ(以後逆ループと呼ぶ)ないしそれに類するH-Vsi関係が多く認められた。これはあまり通常ではないことなので、その原因について種々検討を行つて見た。

4.2. 結果の概要

阿波中央橋のおかれている境界条件を示すべく、観測点の横断図(含む電波流速計配置地点)と、付近空中写真(図-4.1~2)を示す。図-4.2に示すように、中央橋下流約1kmに取水堰柿原堰があり、この堰は最も左岸部に開口部(約200m)があり、出水時、水流は堰全幅(約1km)にわたって自由落下あるいは潜りの堰の形態をとると思われる。

ただし筆者は、堰形状について上記のように思いこんでいたが、確認した結果、最左岸0mでTP.12.9m、300mでTP.12.7m最右岸800mでTP.13.9mといった左岸側が低い構造の堰であった。

次いで、図-4.1に示す電波流速計6基のうち、左岸高水敷のch.1は、H-Vs関係が時計まわりループを示し、ほぼすべて高水敷の河床低下と対応すること、また、右岸ch.6はワンド上にあり、大出水時のみ上流から流水が

あるが、ほとんど河床変化がないこと理由から検討から外し、対象は低水路のch.2~ch.5の4点とする。なお、ch.2~3が相対に左岸側、ch.4がほぼ中央、右岸側はch.5ということも指摘しておきたい。

ほかに、H-Vsi関係を明瞭にするため、データ処理として5点移動平均を行って、H-Vsi図を作成した。漸く、結果の紹介に入る。

相対に大きい8出水、2004年4出水、2005年1出水、2011年3出水を選び、各地点のH-Vsi図、4×8=32枚を作成したが、すべてを示すことはできないので、概観し、4つのループパターン(F1~F4)に分類することができた。それを表-4.1にまとめた。表中には最大流量(Qmax)および地点最大流速(Vmax)、加えて左右岸水位差も付記してある。また、F1~F4の例も図-4.3~6に示す。

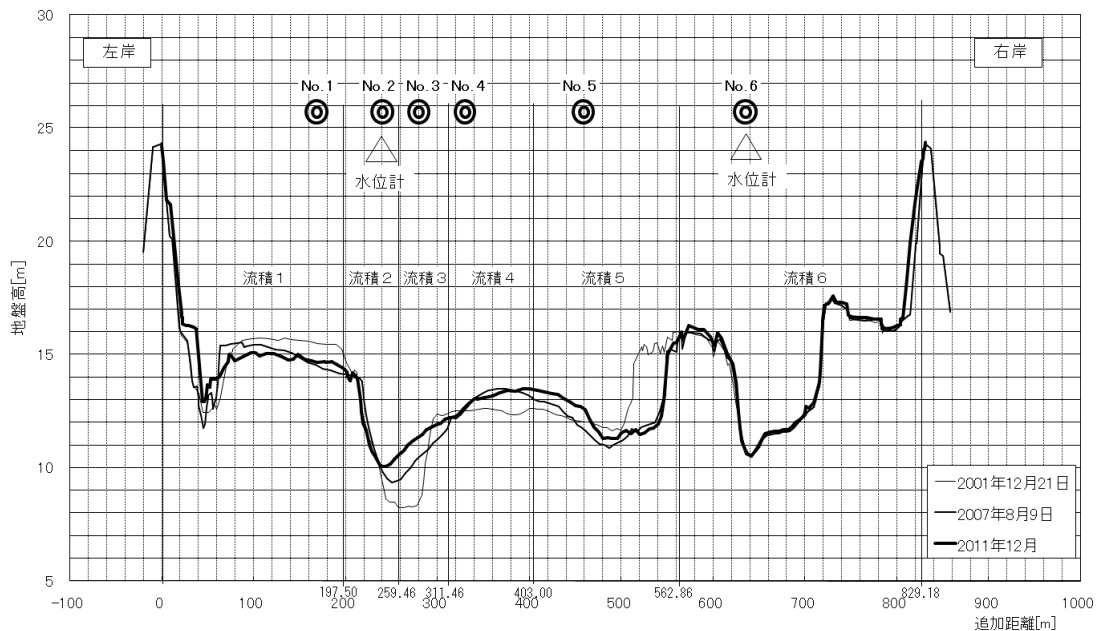


図-4.1 阿波中央橋上流15mの横断と電波流速計及び水位計設置位置図



図-4.2 阿波中央橋付近空中写真(2002.5)

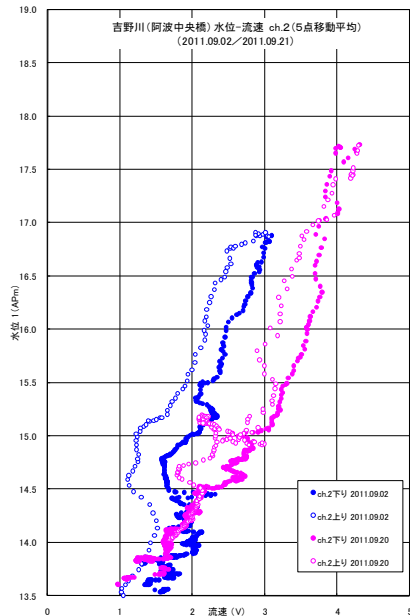


図-4.3 H-Vs F1の例

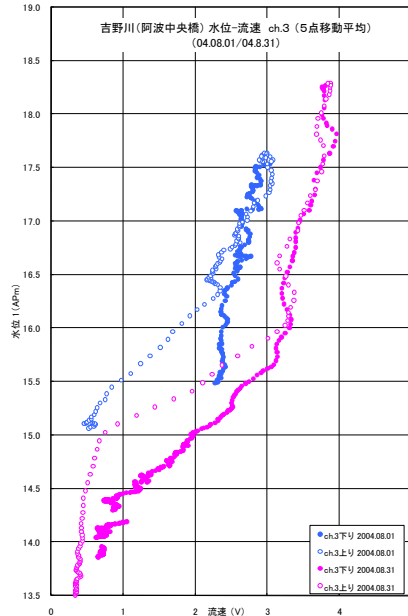


図-4.4 H-Vs F2の例

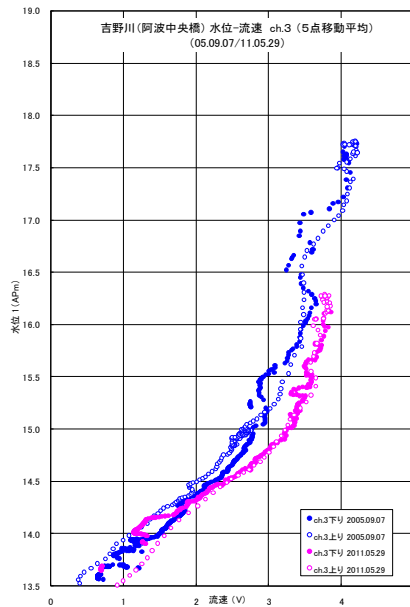


図-4.5 H-Vs F3の例

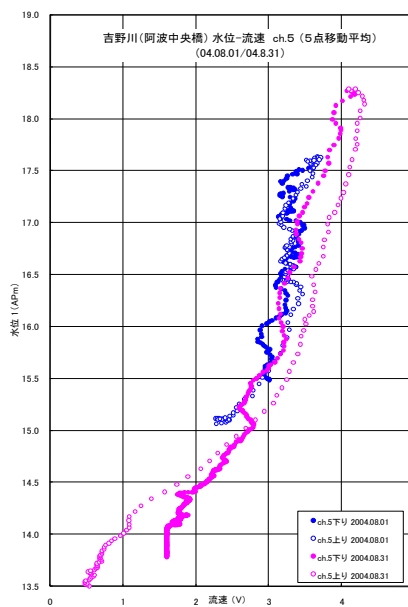


図-4.6 H-Vs F4およびF3の例

さて、問題の所在であるが、上述ループパターンのうち、通常のパターンF4（反時計まわり）が3 1例中わずか4しかなく、他（F1～F3）は、始めに述べたように河床低下あるいは粗度低下といった何らかの変化がなければならぬ。ところが観測断面あるいは洪水流観用断面（第一及および第二）にはそのような変化は生起していない。加えて1km下流には、堰という支配断面があり、常識的には水面形も流量に応じて相対に固定されたものとなるはずである。

そろそろ原因の紹介に入ろう。

筆者は、4時期（1998, 2002, 2005, 2007）の空中写真から、柿原堰から上流部での砂州移動に気付いていた。

一例を示しておこう（図-4.7, 2002～2005）。なおこの砂州移動は、相応規模の出水がないと顕著にはあらわれない。なお砂州長の規模は、500mから1km程度である。

そのような眼で、柿原堰から中央橋までの前述空中写真4枚（図-4.8）を比較いただくと、柿原堰上流、とくに左岸部分の砂州（あるいは島）が小さくなっていくのが読み取れる。他に対照的に右岸側への堆積も認められる。

これは、砂州の移動、それも砂州の山部分の移動ではないか？そう考えれば、堰地点の水位は、支配断面故に変わらなくても、堰から中央橋に至る1kmの区間での河

表-4.1 H-Vsi 関係のパターン分け

出水日	ch.2	ch.3	ch.4	ch.5	左右岸 水位差
Qmax (m ³ /s)	Vmax (m/s)	Vmax (m/s)	Vmax (m/s)	Vmax (m/s)	(m)
04.8.1 7,800	F4 2.4	F2 3.0	F4 2.9	F3 *3.7	0.2
04.8.31 12,300	F1 2.9	F2 3.9	F4 3.5	F4 *4.3	0.35
04.9.30 8,800	F1 3.4	F2 *4.3	F1 3.9	F2 3.8	0.7
04.10.20 14,500	F3 4.3	F3 4.9	F3 *5.0	欠測	0.9
05.9.7 12,500	F2 3.7	F3 *4.2	F2 *4.2	F2 3.9	0.65
11.5.29 6,700	F3 3.4	F3 *3.8	F3 3.5	F3 3.2	0.2
11.09.0.2 6,900	F1 3.0	F2 *3.6	F3 3.5	F2 2.9	0.3
11.9.21 12,800	F2 4.3	F3 *4.4	F2 3.4	F2 3.8	0.5

*: 4地点の max

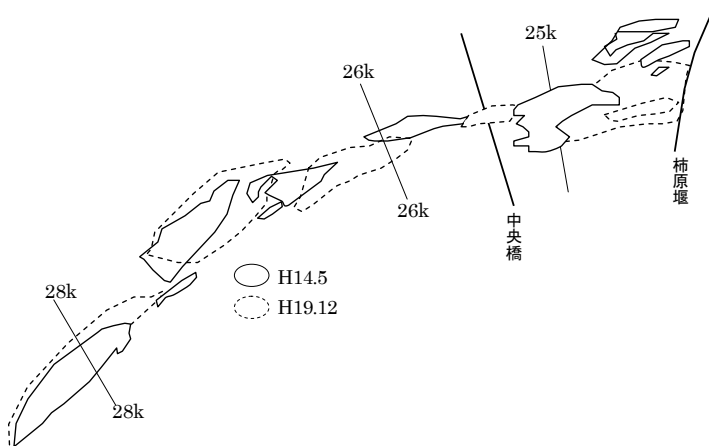
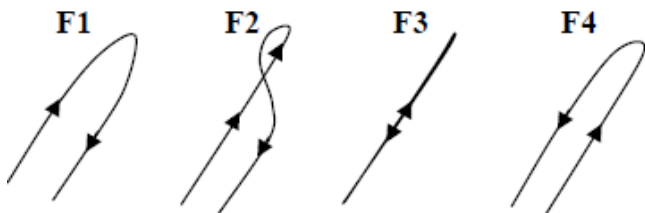


図-4.7 砂州の移動図 (2002と2007)

床低下があれば、一出水期間中に中央橋の水位低下、ひいてはF1~F3の逆ループパターンが起きたのではなからうか。

推論の確認のために、堰上流24.5kmと25kmの横断変化図(03.2, 05.4, 06.4, 11.12)を作成した(図-4.9~10, 堰位置は24.1~2km付近)。両断面とも左岸側で、

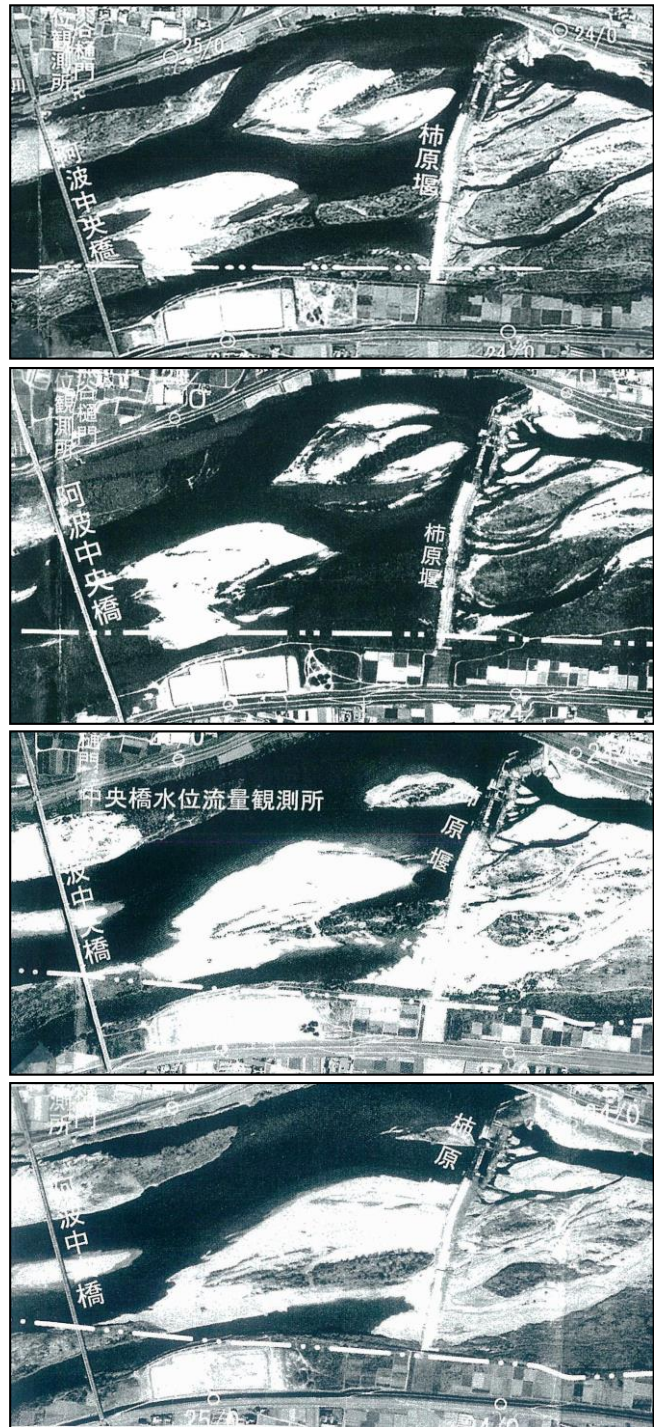


図-4.8 柿原堰から阿波中央橋の空中写真 (上から98, 02, 05, 07)

04年の4出水があった03.2~05.4に大きな河床低下, 05年の1出水をはさむ06.4~11.12でも少し低下が認められ、主として左岸側での河床低下が確認された。加えて、その規模の大小から判断すると、表-4.1中に出水のQmaxが示してあるが、Qmaxが10,000m³/s(?)を超えないと大量の土砂移動が期待できないことも推測される。

他に、24.5km断面では、右岸側低水路での顕著な堆積が認められるが、これは堰高の右岸側1m高の形状の反

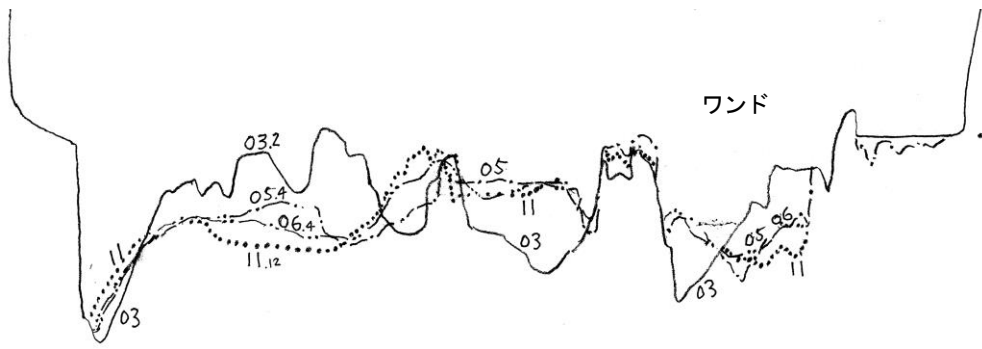


図-4.9 堰上流24.5km横断比較図

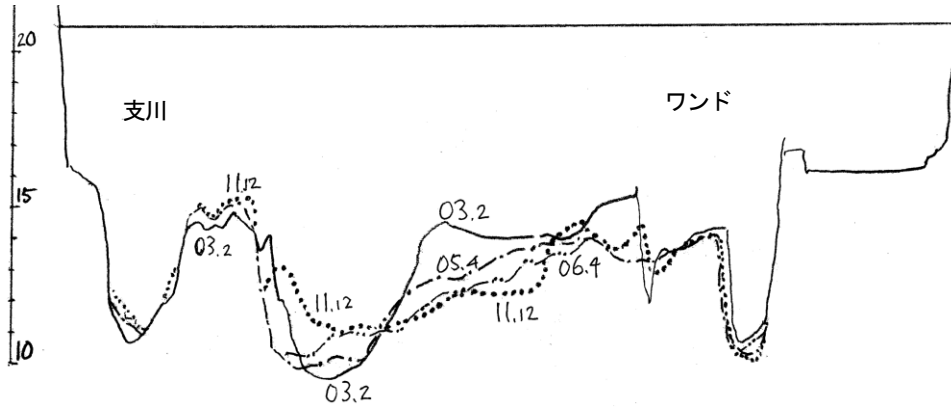


図-4.10 堰上流25.0km横断比較図
(03.2, 05.4, 06.4, 11.12)

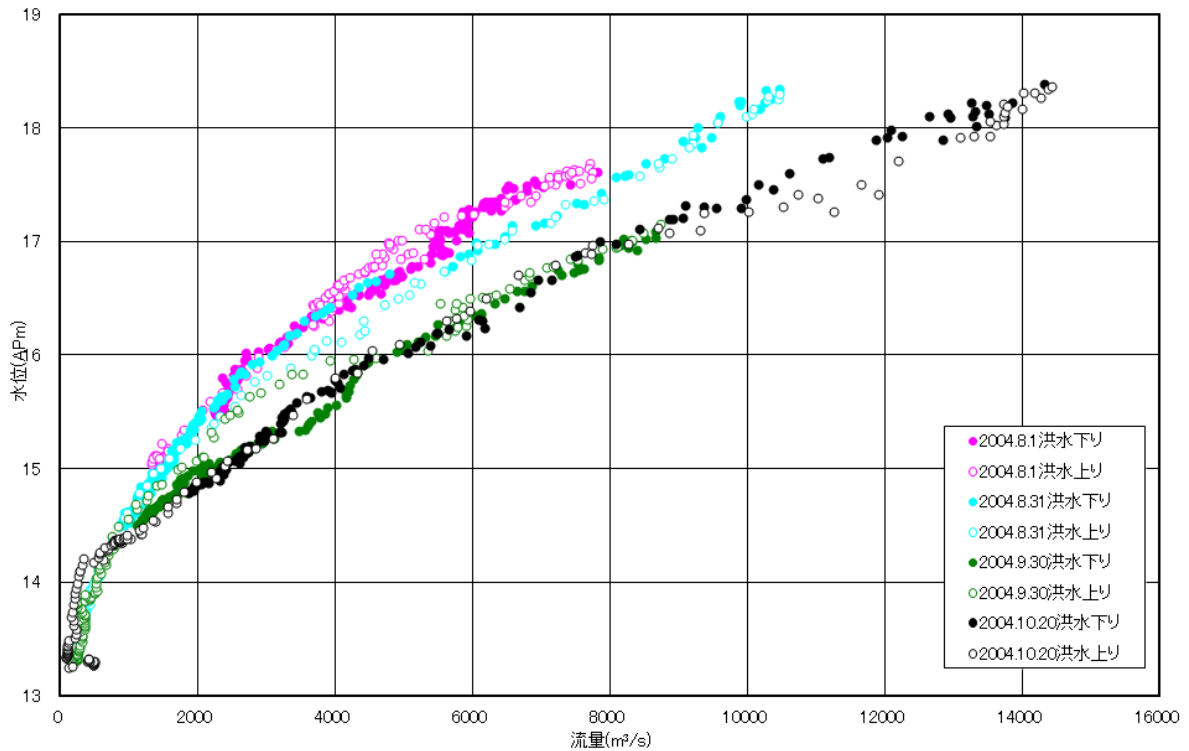


図-4.11 H~Q変化図, 阿波中央橋 (04の4出水)

映もあって、表-4.1中の「最大流速位置の右岸から左岸への移行」あるいは、「2004年4出水における洪水規模によらない阿波中央橋左右岸水位差の漸増」という現象を裏付けているものといっておく。

なお、H~Q関係にも、流量の増加が認められている。

一例を示しておく(図-4.11)。

ループパターンについては、正確なことはわからなかったが、以下の2点、本来パターンのF4が初期2出水のみ4か所(砂洲の山の終り?)、次に「F1とF2は、同パターンと見做してもよいのではないか。そしてF3は、

F1=F2とF4の中間形状，例えば出水がシャープであれば，本来F1=F2のものがF4パターンに引きずられてF3になりうる」と考えれば，いくぶん整理できたようにも思える（F1=F2の表は省略）．ちなみにF3のみの出水が2つあり，いずれもハイドロはシャープであった．

最後に，では「現在は砂州の谷か？，これから徐々にF4型があらわれるか」であるが，橋下流の第一および第二測線には堆積傾向のきざしが見えるものの（図省略），断定できるほどではなく今後の観測を待ちたい．

4.3 まとめ

異様といえる時計まわりが支配的なH-Vsiパターンもどうやら，取水堰上流の砂州の山の消滅が原因らしい，ということになった．堰ではなく通常の河道だったら，通過した砂州の山のバックでそうはならなかったかもしれないが，それは観測事例が少なく，なんともいえない．例えば砂州が重畳する安倍川とか，近く的那賀川で確かめたいことであろう．

5. 長期観測の重要性

吉野川阿波中央橋に電波流速計が設置されてはや13年が経つ．4章でふれたように，砂州の移動にも10年かかってまだその移動が完了したか不明ということ．たまたま堰があって顕在化したのかもしれないが，長期それも相当に長期の継続観測が必要なことがわかる．

同様なことは，利根川の八斗島にもいえる．電波流速計を設置した橋が廃橋となり，期間は7年間であったが，大規模な砂州の流下があり，H-Vsi関係の大きな変化を，数回の出水にわたって経験した．

川の変化は少ない，一時期のみで判断せず，長期間設置し，変化を十分に監視してこそ，技術の進歩があるのではないか．

6. あとがき

より正確な洪水流量が知りたいは，建設省の時代からの河川技術者のなかなか果たせない夢だった．電波流速計は，現場に設置されるようになって以降，相応の技術レベルに達し，これから流量データが洪水の始めから終りまで，オンラインで出されるようになるかと思われた矢先，より正確な，しかし人力によるADCPの出現によって，その普及は数歩も後退したように筆者には感じられる．

「流速」という新しい水理量を親しく眺めて，技術者の洞察力が養われるのである．

あと10～20年後に，どうすれば正しかったのかがわかるであろう．

謝辞：国交省利根川上流河川事務所および徳島河川国道事務所の調査課の方々には，種々データの提供をいただいた．感謝の意を表したい．また論文の作成に関しては，(株)東京建設コンサルタントの河口尚子氏の絶大な協力を得た．同よう感謝を申し上げる．

参考文献

- 1) 木下良作：航空写真による洪水時の流況測定，水工学シリーズ68-12．1968，航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集，No.345，PP1～19．
- 2) 酒井雄弘，二瓶泰雄：ADCPデータに基づく大河川洪水流の更正係数に関する検討，水工学論文集，Vol.51，pp.1081～86，2007．
- 3) 山口高志：洪水流速および流量観測 —その1—水水学会誌，pp.625～635，No.6，Vol.15，2002．
- 4) 木下良作：河川流量と流れの構造 —ADCPによる観測報告—土木研究所での講演会 2002など．
- 5) 山口高志：洪水流速および流量観測 —その2—水水学会誌No.4，Vol.16，2003．
- 6) 山田正：Commom MPプロジェクトの進展と今後の河川流量観測の重要性，「河川流量観測の新時代」Vol.1，2010
- 7-9) 水水学会研究グループ「河川流量観測 高精度化研究会編：河川流量観測の新時代，Vol.1～3．2010～2012．
- 10) 土木研究所：流量調査手法に関する検討業務（河川情報センター，2008）
- 11) 土木研究所，メーカー他による共同研究：非接触型流速計測法の開発，土木研究所共同研究報告，No.291，2003他
- 12) 山口高志・新里邦生：電波流速計による洪水流量観測，土木学会論文集，No.497/II-28，1994．
- 13) 山口高志：電波流速計のこれまで—川の中が見える—，河川観測技術研究所，2008．
- 14) Costa,J.E.et al：Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods,W.R.R, Vol.42，2006

(2014. 2. 10受付)